

Installation and Commissioning of Coolant Pumps for Nuclear Power Plant Reactors

Feng Wang

China National Nuclear Corporation China Central Plains Foreign Engineering Co., Ltd., Beijing, 100044, China

Abstract

The reactor coolant pump(RCP) is a major Reactor Coolant System(RCS) equipment of a nuclear power plant(NPP). It undertakes the key role of transporting coolant and transferring heat from the reactor, and is the only rotating equipment that needs to operate continuously in a PWR. Taking the RCP of an exported 300MW NPP by China as example, this paper introduces its modular design and main structure, elaborates on the key steps and core requirements of on-site installation, and clarifies the interlock conditions, operation monitoring and emergency shutdown scenarios during commissioning. It provides a reference for the installation, commissioning and operation of similar equipment

Keywords

Reactor Coolant Pump; RCP; PWR

核电站反应堆冷却剂泵的安装与调试

王峰

中核集团中国中原对外工程有限公司, 中国·北京 100044

摘要

反应堆冷却剂泵是核电站一回路核心设备, 承担输送冷却剂、传递反应堆热量的关键作用, 是压水堆核电厂唯一需长期连续运行的转动设备。本文以我国出口承建的300MW核电站轴流型核主泵为研究对象, 介绍其模块化设计、主体结构及辅助系统, 阐述现场安装的关键步骤与核心要求, 明确调试中的连锁条件、运行监测及紧急停机场景。为同类型设备的安装调试和运行提供参考。

关键词

反应堆冷却剂泵; 核主泵; 压水堆核电站

1 引言

核能作为一种清洁、高效、稳定的能源, 在全球能源结构中发挥着日益重要的作用, 而核电站的安全稳定运行对能源安全和环境保护至关重要。反应堆冷却剂泵(简称核主泵, RCP)被誉为核电站一回路的“心脏”, 是维持一回路正常运行的核心转动设备, 其运行可靠性直接决定了整个核电站的安全性和经济性。核主泵具有高压、高温、高辐射、维护难度大的特点, 这对其设计、安装和调试提出了严格要求。近年来, 随着核电技术的不断发展和出口项目的拓展, 核主泵的安装调试技术已成为影响核电站建设进度和运行安全的关键环节。

2 核主泵简介

反应堆冷却剂泵(以下简称核主泵)是核电站一回路

的“心脏”, 用于输送规定流量的反应堆冷却剂, 使其在反应堆压力容器、蒸汽发生器和主管道组成的密闭系统中循环, 将反应堆产生的热量传递给二回路介质, 是压水堆核电厂核蒸汽供应系统中唯一需长期连续运行的转动设备。

2.1 核主泵的性能参数

我国出口承建的某300MW核电站核主泵为轴流泵, 具有流量大、扬程高、可长期连续运行的特点, 其主要性能参数如下表所示:

| 参数类别 | 具体参数 | 数值 |
|--------|----------------|------------------------|
| 设计参数 | 设计流量 | 16800m ³ /h |
| 设计参数 | 设计扬程 | 60m |
| 效率 | 核主泵机组总效率(额定工况) | 78% |
| 正常运行工况 | 泵进口压力 | 14.99MPa |
| 正常运行工况 | 泵进口温度 | 289.1℃ |
| 设计工况 | 压力 | 17.16MPa |
| 设计工况 | 温度 | 350℃ |

2.2 核主泵的设计

核主泵设计满足安全、高效、检修方便的要求, 主要

【作者简介】王峰(1981—), 男, 中国山西人, 硕士, 高级工程师, 从事核电设备采购管理研究。

设计特点包括：供油系统内置于电机支座；设有可移动中间轴段，便于不拆电机维护轴密封；与一回路介质接触部件采用马氏体不锈钢锻件，无焊缝；内部组件可一次性吊出，便于维护检修；三级动压主轴密封可互换，带停车密封；水力部件（如叶轮、导叶）采用锻造数控加工工艺。

2.3 核主泵的结构

该型核主泵为立式轴流泵，主体结构由上至下分为电机、双向推力轴承、水力部件三部分，另有承压部件及辅助系统保障运行。^[1]

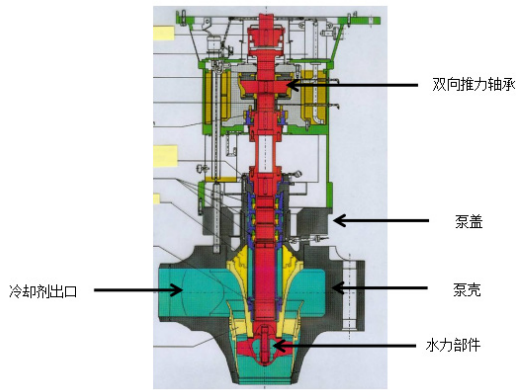


图 1 核主泵剖面图

2.3.1 核主泵电机

核主泵电机为额定功率 4500kW 的异步双向交流电动机。

2.3.2 双向推力轴承

双向推力轴承承受转子自重（向下）、叶轮水推力（向下）、一回路系统压力（向上）的合力，确保泵可靠运转。系统压力正常时，向上载荷约 80 吨；低压时，承受向下载荷。其主要部件包括上泵轴、轴承箱体、推力盘、主副推力瓦及弹簧板。

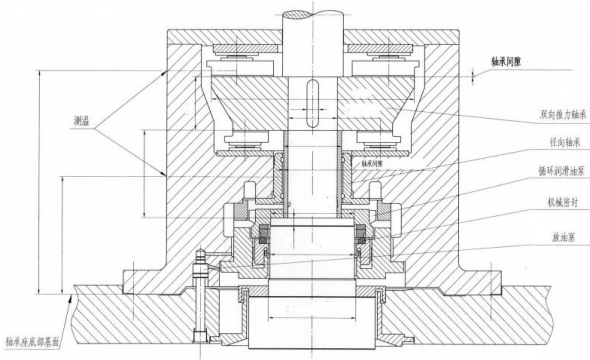


图 2 双向推力轴承

2.3.3 水力部件

水力部件由叶轮、导叶、下泵轴组成，是核主泵水力性能的核心。叶轮为整体锻造，5 个叶片，通过螺栓与下泵轴连接，定位销传递扭矩；导叶 11 片，安装于叶轮罩壳内。

冷却剂从叶轮下方进入，经导叶后水平流出，完成循环。

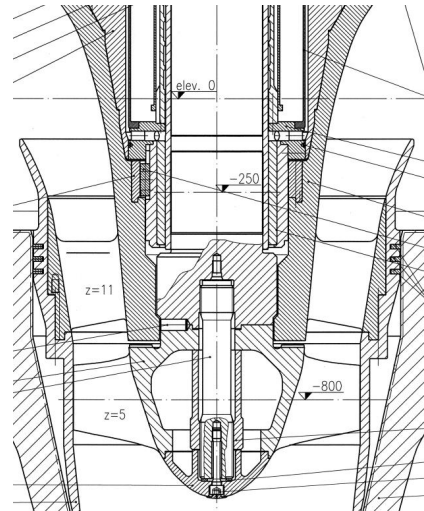


图 3 水力部件（局部）

2.3.4 承压部件

承压部件包括泵壳、泵盖、主螺栓、密封室等，构成一回路密封腔，承受 15MPa 高压，将放射性冷却剂与外界隔离。

2.4 辅助系统

核主泵无备用泵，且位于高放射性安全壳内，维修不便，因此设计有辅助系统，包括轴封注入水供应、应急注入水、高压 / 低压泄漏、停车密封及滑油供应系统，实现监控与联锁保护。

2.4.1 注入水供应、高、低压泄漏系统以及停车密封

注入水系统为轴密封提供高压低温注入水（约 2000L/h），过滤后分为两路：1200L/h 冷却三级轴密封并经泄漏系统排出，800L/h 冷却下水导轴承后汇入一回路。轴密封泄漏分为高压（导入化容系统）和低压（导入疏排水系统），分别设有温度、流量及压力监测。^[2]

三级轴密封之后单独设置一道停车密封。核主泵正常运行时停车密封开启；再核主泵停止（转速为零）、一回路水压试验或事故工况时，高压氮气注入使密封向上闭合，防止冷却剂泄漏，其 O 型圈可承受 350℃ 高温。

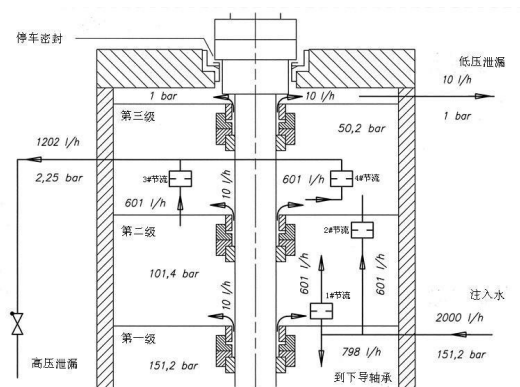


图 4 轴密封运行图

2.4.2 应急注入水供应系统

正常注入水系统失效时，应急系统启动，从泵壳引出一回路高温高压介质，经旋液分离器过滤、高压冷却器冷却至 55℃以下后注入轴密封。当正常注入水流量低于 1500kg/h 并持续 3s，且满足相关工况时，电动阀开启，系统启动。

2.4.3 滑油供应系统

系统由顶油泵、回油泵、滑油冷却器等组成。启动阶段，顶油泵向推力瓦泵入高压润滑油形成油膜；启动后，油叶轮带动润滑油自循环，经冷却器换热，保障轴承润滑冷却。

3 核主泵的现场安装

该机组核主泵于 2009 年 11 月启动现场安装，2010 年 5 月完成安装与调试。

3.1 安装前准备工作

安装前需准备好安装手册、人员、耗材、工具及大型吊装设备，搭建专用操作平台并编制吊装程序。由于要求安装精度与出厂一致，优先选用参与过出厂组装的人员。除常用工具外，核主泵配备专用工具及详细清单图纸，用于特殊部件安装检修。轴密封组件需在二级清洁度（DIN25410）环境下装配，配套有输送轨道、吊装盘等专用工具。

3.2 核主泵的安装

3.2.1 水力部件的装配

叶轮、导叶等部件均为整体锻造，叶轮与下泵轴通过螺栓紧固、定位销传扭，导叶与密封室连接后，整体吊装入泵壳。

3.2.2 推力轴承及滑油系统的装配

双向推力轴承整体装入电机支座，环绕轴承箱体设置 3 个蓄油槽，冷却器、顶油泵等安装于其上，冷却水管与冷却水系统连接。滑油机械密封装配于联轴器，泄漏油槽设有油位计，实现油泵启停控制，整个系统置于电机支座内，降低火灾风险。

3.2.3 轴密封及停车密封的装配

轴密封为三级模块化设计，可互换，一、二级装配在一起，三级单独组装，依次安装于下泵轴；停车密封装配于三级密封之上，作为最后一道安全屏障。

3.2.4 辅助系统的装配

辅助系统整体运至现场，现场主要完成与泵体管路接口的连接，接口法兰采用螺旋缠绕垫片，确保水压试验零泄漏。

3.2.5 泵与电机的对接

泵与电机通过鼓形齿联轴器柔性连接，可缓冲轴系振动。轴系对中精度要求极高（径向误差 0.03mm，轴向误差 0.02mm），通过调整可拆轴段、上泵轴及电机轴实现，对中对后紧固螺栓并安装定位销。轴系对不合格会导致振动增

大，甚至轴系断裂，需经验丰富技师操作。

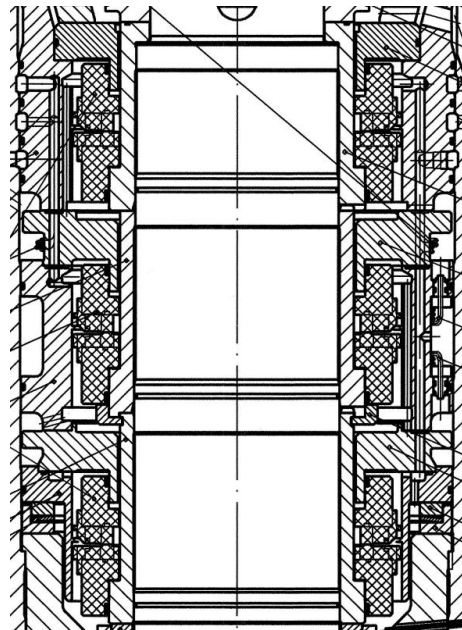


图 5 模块化集装箱式轴密封

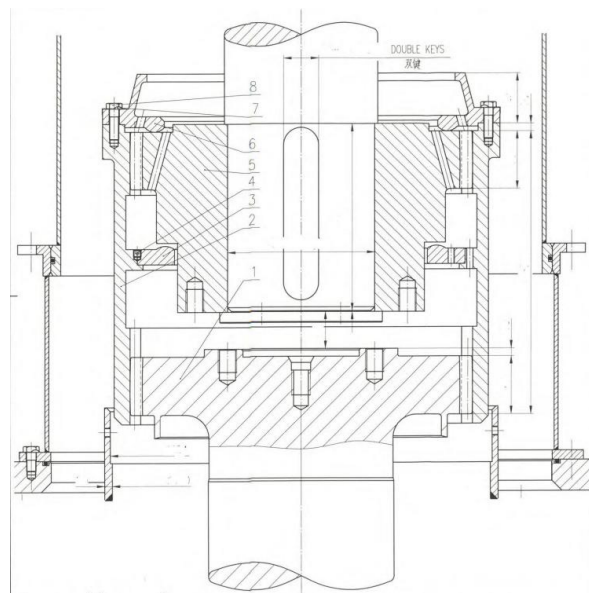


图 6 鼓形齿联轴器

3.2.6 安装特点

螺栓紧固采用对称方式，分批次进行，确保受力均匀，且有严格力矩要求，需使用力矩扳手。内六角头螺栓配套专用锁紧垫片，通过敲击锁片中心孔实现锁紧。

4 核主泵的调试

核主泵作为一回路唯一转动设备，需在一回路水压试验前完成细致调试。

4.1 核主泵的起动和停止

启动前需装满润滑油，启动顶油泵形成油膜，且所有仪表信号满足联锁要求方可启动。

启动及运行注意事项：首次启动需两次点动，确认旋转方向及运转正常；监测机组及轴系振动（分别不超过

50 μ m、120 μ m）；通过泄漏油泵启停间隔（3~10小时）判断润滑油量；关注主推力轴承温度（超95 $^{\circ}$ C需分析原因）；监测轴密封运行状态；测量机组启停及惰转时间；反应堆加热时监测机组位移。

出现下表中任一情况，核主泵将立即保护停泵。

表 2 核主泵起动联锁保护一览^[3]

| 仪表位号 | 描述 | 值 | 所属系统 |
|-------|------------|---------------------|--------|
| FE801 | 轴封注入水流量 | ≥ 1700 kg/h | 轴封水系统 |
| FE803 | 高压泄漏流量 | 250~1300kg/h | 高压泄漏系统 |
| V06 | 应急轴封水电动截止阀 | 关闭 | 轴封水系统 |
| V05 | 高压冷却器旁通阀 | 关闭 | 轴封水系统 |
| V02 | 低压泄漏流电动截止阀 | 打开 | 低压泄漏系统 |
| TE807 | 高压冷却器后温度 | 52 $^{\circ}$ C | 轴封水系统 |
| PT805 | 顶油泵压力 | ≥ 15 bar | 润滑油系统 |
| PT806 | 1# 泄漏油泵压力 | 0.5bar | 润滑油系统 |
| PT807 | 2# 泄漏油泵压力 | 0.5bar | 润滑油系统 |
| TE804 | 油冷却出口温度 | $\leq 20^{\circ}$ C | 润滑油系统 |
| LS808 | 电机上部油冷器油位 | min | 核主泵电机 |
| LS809 | 电机下部油冷器油位 | min | 核主泵电机 |

表 3 核主泵停泵联锁保护一览^[3]

| 仪表位号 | 描述 | 值 |
|-----------|-------------|----------------------------------|
| PT801 | 一级轴密封前压力 | < 2 MPa |
| TE807 | 高压冷却器后轴封水温度 | $> 57^{\circ}$ C |
| TE801 | 轴向（推力）轴承温度 | $> 110^{\circ}$ C |
| TE809/810 | 高压泄漏流温度 | $> 95^{\circ}$ C |
| FE803 | 高压泄漏流量 | 250kg/h~1300kg/h |
| FE804 | 高压泄漏流量 | 200kg/h~1350kg/h |
| GS801 | 停车密封限位开关 | 关闭 |
| GS802 | 停车密封限位开关 | 关闭 |
| LS801 | 轴承箱体油位 | min |
| FE801 | 轴封水流量 | FE801 < 1500 kg/h |
| V06 | 应急轴封水截止阀 | 且 V06 关闭超过 45 秒 |
| GS803/804 | 电机飞轮位置指示 | 启动 |
| YE801 | 电机转速 | 核主泵运行时 < 200 min ⁻¹ |

4.2 核主泵仪表和联锁保护

调试中需对各项联锁保护进行动作试验，主要包括顶油泵、泄漏油泵、各系统阀门的联动，仪表用于监控温度、压力、流量，确保异常工况下及时动作，详细清单参见相关手册。

5 结语

该型核主泵采用电机、水泵轴承、泵体模块化设计，

高质量、高效率地满足了核电站的安全运行要求。

参考文献

- [1] 战仕全, 齐增辉. ANDRITZ新型反应堆冷却剂核主泵简介. 维普资讯www.cqvip.com 2003
- [2] 陈捷. 巴基斯坦恰希玛核电站核主泵轴密封[J]. 水泵技术 2003 (1)
- [3] Andritz AG. 《Operating and Maintenance Manual for the Coolant Pumps》 Rev.01, 2009